DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170243

张明智, 牛文全, 路振广, 李元, 王京伟, 邱新强. 微润灌对作物产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170243
Zhang M Z, Niu W Q, Lu Z G, Li Y, Wang J W, Qiu X Q. Effect of moistube-irrigation on crop yield and water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170243

微润灌对作物产量及水分利用效率的影响*

张明智[1,2,3], 牛文全[3,4**], 路振广[1,2], 李 元[4], 王京伟[4], 邱新强[1,2]
(1. 河南省水利科学研究院 郑州 450000; 2. 河南省节水灌溉工程技术研究中心 郑州 450000; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100)

摘 要: 为探明微润灌对作物生长及产量的影响, 以夏玉米和冬小麦为研究对象, 采用完全随机试验设计, 对比研究微润灌不同毛管间距布置(20 cm、40 cm与60 cm)、地下滴灌和无灌溉对大田作物产量、水分利用效率和土壤电导率的影响。结果表明: 与地下滴灌相比, 微润灌灌水量约为地下滴灌的1/4~4/5; 由于灌水差异较大, 作物产量有所降低, 夏玉米产量显著下降(P<0.05), 冬小麦产量下降, 但未达显著水平(P>0.05); 两作物水分利用效率有所提高, 但差异不显著(P>0.05); 灌溉水分利用效率均显著提高(P<0.05)。随微润管布置间距的减小, 作物产量呈增加趋势, 作物水分利用效率与灌溉水分利用效率均呈减小趋势。综合考虑分析, 在较为缺水的塿土区微润管最佳布置间距60 cm, 此时可不显著降低产量同时提高水分利用效率。此外, 微润灌布置间距对土壤电导率的影响较小。采用微润灌与地下滴灌处理时, 随土层深增加, 作物各生育期土壤电导率无显著差异(P>0.05)且变化趋势基本一致, 表明微润灌与地下滴灌对土壤的影响具有一致性。微润灌下作物产量与灌浆成熟期10~20 cm土层土壤电导率和10~80 cm土层土壤平均电导率之间相关性显著。因此, 采用灌浆成熟期10~20 cm土层土壤电导率或10~80 cm土层土壤平均电导率预估微润灌下的作物产量具有可行性。上述研究可为微润灌技术推广应用提供依据。
关键词: 微润灌; 地下滴灌; 产量; 水分利用效率; 土壤电导率; 夏玉米; 冬小麦
中图分类号: S513; S512.1+1;S275.4;S153.2 **文献标识码**: A

Effect of moistube-irrigation on crop yield and water use efficiency*

ZHANG Mingzhi[1,2,3], NIU Wenquan[3,4**], LU Zhenguang[1,2], LI Yuan[4], WANG Jingwei[4], QIU Xinqiang[1,2]
(1. Henan Provincial Water Conservancy Research Institute, Zhengzhou 450000, China; 2. Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research in Henan Province, Zhengzhou 450000, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In this study, summer corn and winter wheat were used to explore the effect of moistube-irrigation on crop growth and yield to support the generalization and application of moistube-irrigation technology. Comparative experiment was set up in a completely randomized design in order to determine yield, water use efficiency of summer corn and winter wheat and soil electrical conductivity. The treatments of the experiment included moistube-irrigation with different distances between moistubes (60 cm, 40 cm and 20 cm) and subsurface drip irrigation and no irrigation as the controls. The irrigation amount of moistube-irrigation was 1/4–4/5 that of subsurface drip irrigation. The results showed crop yield decreases under moistube-irrigation treatments due to lower irrigation amount. However, the decrease was not significant for winter wheat though it was significant for summer corn. Water use efficiencies of both crops were not significantly changed under moistube-irrigation treatments compared with the treatment of subsurface dir irrigation, while the irrigation water use efficiencies of crops were increased significantly. While crop yield increased with decreasing moistube interval, crop water use efficiency and irrigation water use efficiency decreased. For the Lou soil region which contains less water, the best moistube layout distance in the region was 60 cm according to the results of crops yields and water use efficiencies. This improved irrigation water use efficiency without significantly reducing yield. In addition, moistube

* 河南省基本科研业务费、河南省水利科技攻关计划项目(GG201602)、国家重点研发计划项目(2016YFC0400202)和国家自然科学基金项目(51679205)资助
**通讯作者: 牛文全, 主要从事灌溉理论与节水技术研究。E-mail: nwq@nwsuaf.edu.cn
张明智, 主要从事节水灌溉新技术研究。E-mail: mingzhiz@yeah.net
收稿日期: 2017-03-21 接受日期: 2017-07-15
* This study was supported by the Henan Province Basic Research Business Expenses, Henan Province Water Science and Technology Breakthrough Project (GG201602), the National Key Research Project of China (2016YFC0400202) and the Natural Science Foundation of China (51679205).
**Corresponding author, E-mail: nwq@nwsuaf.edu.cn
Received Mar. 21, 2017; accepted Jul. 15, 2017

distance had little effect on soil electrical conductivity. With increasing soil depth, there was no significant difference ($P > 0.05$) in soil electrical conductivity in each growth period of two crops. Also it's variation trends in moistube-irrigation and subsurface drip irrigation were very similar. It suggested that the effect of moistube-irrigation and subsurface drip irrigation on soil electrical conductivity was consistent. Therefore, moistube-irrigation was much as applicable in summer maize and winter wheat cultivation as subsurface drip irrigation. The correlation between crop yield and soil electrical conductivity at the 10–20 cm soil layer and average soil electrical conductivity at the 10–80 cm soil layer was significant under moistube-irrigation. Hence, it was feasible to estimate crop yield by using soil electrical conductivity at the 10–20 cm soil layer and average soil electrical conductivity at the 10–80 cm soil layer. The above research provided the basis for the application of moistube-irrigation technology in summer corn and winter wheat cultivation.

Keywords: Moistube-irrigation; Subsurface drip irrigation; Yiesl; Water use efficiency; Soil electrical conductivity; Summer corn; Winter wheat

微润灌是一种新型微灌技术，产品结构简单、运行费用低，具有改善土壤水气环境，减少地表蒸发，抗堵塞性强，节水效果显著等优点。微润灌类似于渗灌技术，微润管整体出流且流量小，可实现作物生育期持续性供水，其流量在一定范围内随工作压力的增加呈线性增加关系，小区微润灌流量也可通过改变微润管布置间距来实现，从而对作物的生长产生影响[1-3]。研究发现，微润灌的净效益比大于滴灌、喷灌[4]。微润灌(续灌)处理的土壤水分分布均匀度大于滴灌(间歇灌)。在轻度盐渍土壤中，微润灌处理下的桶栽玉米(*Zea mays* L.)光合速率高于滴灌、直浇灌。与沟灌对比，微润灌可显著提高温室黄瓜(*Cucumis sativus* L.)产量与水分利用效率。滴灌处理下的番茄(*Lycopersicon eseulentum* Miller)产量与水分利用效率低于微润灌，微润灌可有效减少蒸发，对于提高果树水肥利用效率具有显著作用[2,5-6]。但微润灌作为一种流量较小的续灌，目前还没有技术标准和规范，也没有大面积大田实践经验，其应用还非常有限，并存在一些问题，例如因灌水器灌水量较小，对大田作物，如夏玉米、冬小麦的产量及水分利用效率的影响如何？是否同滴灌一样对大田作物具有相同适用性？能否满足大田作物关键需水期的供水要求？

不同灌水技术的土壤水分分布不同，土壤养分、盐分分布也将有所差异。土壤电导率能够反映土壤含水率、盐分、有机质、土壤酶、土壤容重与土壤孔隙等，对于判断土壤盐渍化程度、肥力质量特征和污染程度方面具有重要意义，是评价农作物生长环境的重要指标，它对于确定土壤空间分布差异具有重要的意义[7-8]。有研究表明土壤电导率在作物主要生长阶段最大，随生育期的变化呈先增加后减小的趋势。在土壤电导率一定范围内，棉花(*Gossypium hirsutum* L.)、玉米、小麦等作物的产量随土壤电导率的增加呈增加趋势，且存在不同程度的相关性，可作为土壤生产潜力的评价指标之一[9-16]。但在微润连续小流量灌溉条件下，土壤电导率如何变化，是否同滴灌一样对土壤电导率存在相同影响？微润灌下土壤电导率与作物产量之间是否存在一定相关关系？

为探明上述问题及为大田微润灌技术的应用提供支撑，本试验设置微润灌3种微润管布置间距并与地下滴灌、无灌溉对比，分析研究冬小麦与夏玉米根区土壤电导率等的变化过程及对产量、水分利用效率的影响。该研究可为微润灌技术的推广及应用提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　试验概况

试验于2014年7月—2015年6月在陕西省杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站(108°24′E、34°20′N)进行，该试验站海拔521 m，属暖温带半湿润气候，全年无霜期221 d，年均日照时数2 163.8 h，年降水量550~650 mm且多集中在7—9月。2014—2015年夏玉米、冬小麦轮作整个生育期降雨量及温度如图1所示。供试土壤为杨凌塿土，基本养分状况为：有机质16.88 $g·kg^{-1}$、全氮0.94 $g·kg^{-1}$、全磷0.32 $g·kg^{-1}$、全钾11.2 $g·kg^{-1}$，经测定10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、50~60 cm和70~80 cm土层土壤电导率($mS·cm^{-1}$)夏玉米播前分别为4.27、4.34、4.39、4.19和3.79，冬小麦播前分别为2.68、3.71、4.07、3.94和3.74，pH 8.05，经测定80 cm土层内平均田间持水率为31.68%(体积含水率)，体积饱和含水率为60.1%，凋萎含水率为8.5%，土壤容重为1.32 $g·cm^{-3}$，该试验小区地下水埋深大于5 m[17]，因此，忽略地下水补给。

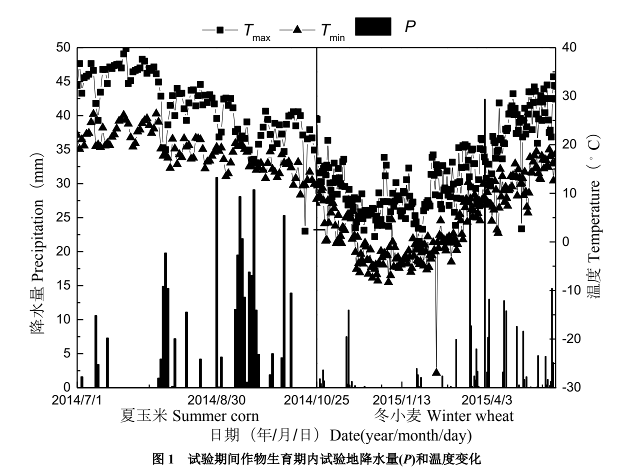


图 1 试验期间作物生育期内试验地降水量(P)和温度变化

Fig. 1 Changes of local precipitation (P) and temperature during growth period of crops during the experiment

T_{max}: 最高气温; T_{min}: 最低气温; P: 降水量。T_{max}: maximum temperature; T_{min}: minimum temperature. P: precipitation.

1.2 试验设计

本试验夏玉米品种为'郑丹 958'，种植密度为 50 000 株·hm^{-2}，株间距 30 cm，行间距 60 cm，2014 年 7 月 1 日播种，同年 10 月 12 日收获，夏玉米全生育期采用经验公式计算有效降雨 325.6 mm[18]。播种前基施有机肥 600 kg·hm^{-2}(N、P、K≥5%，有机质≥45%)、复合肥 750 kg·hm^{-2}(N、P、K≥15%)，拔节期(8 月 6 日)追施尿素 600 kg·hm^{-2}。施肥方式均为撒施。冬小麦品种为'小偃 22'，小麦播种密度为 224.88 kg·hm^{-2}，行距 20 cm。于 2014 年 10 月 25 日播种，划沟撒播，播种深度为 5 cm，2015 年 6 月 7 日收获，全生育期平均天数为 230 d，为了防止微润管冻裂，越冬期(84 d)停止灌溉。采用经验公式计算降雨量为 232.7 mm[18]。播种前基施有机肥 600 kg·hm^{-2}(N、P、K≥5%，有机质≥45%)和复合肥 750 kg·hm^{-2}(N、P、K≥15%)。施肥方式均为撒施。

本研究设置 3 种灌水方式，分别为微润灌、地下滴灌(CK_1)和无灌溉(CK_2)，由于微润灌流量的控制可通过其布置间距来实现，故设 3 种微润管间距布置[60 cm(I_1)、40 cm(I_2)与 20 cm(I_3)]。微润灌的微润管(深圳市微润灌有限公司)管径 16 cm，工作压力为 200 kPa 水头时，流量约为 4 L·(m·d)$^{-1}$，本次试验的工作压力为 40 kPa 水头，实际流量为 50 mL·(m·h)$^{-1}$左右，微润管埋深 20 cm。地下滴灌的滴灌带(甘肃大禹生产内镶贴片式地下滴灌带)管径 16 mm，布置间距 60 cm，滴头间距 40 cm，埋深 20 cm，工作压力 100 kPa，滴头流量为 2.2 L·h^{-1}。本试验为大田完全随机试验，共 5 个处理，每个处理重复 3 次，共 15 个试验小区，随机排列。试验小区大小为 2.8 m×4 m，各小区之间间距 1 m，小区中间埋设 1 m 深建筑防水膜苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)隔离，防止土壤水分横向渗透运移。各处理在全生育期灌水量如表 1 所示。

灌水量的计算及控制：

地下滴灌以灌水上下限控制。即当计划湿润层土壤含水量达田间持水率的 65%以下时，开始灌溉，如果土壤含水量高于控制上限[田间持水率的 90%(θ_F)]，则一直不进行灌溉。灌水量用下式[19]计算：

$$M=100(\theta_F-\theta_i)\cdot\gamma\cdot H\cdot p \quad (1)$$

式中：M为一次灌水量(m^3·hm^{-2})，θ_F为土壤田间持水量，θ_i为H土层内的平均含水率(重量含水率)，γ为土壤容重(g·cm^{-3})，H为计划湿润层深度(m)，p为土壤湿润比(滴灌取p=0.9)。土壤计划湿润层深度在苗期、拔节期、抽雄期与灌浆成熟期分别取 40 cm、60 cm、60 cm 和 60 cm，根据灌水上限和计划湿润层深度计算出次灌水量，再根据滴头流量，计算出灌水时间。

微润灌与降雨量关系密切，遇降雨或灌水上限达到 90%田间持水率(θ_F)，则关闭阀门停止灌溉，雨后动态监测土壤水分，若土壤水分分别达田间持水率的 65%、71%与 77%时(本试验前进行了预试验，测定了微润管间距 60 cm、40 cm 与 20 cm 连续灌水 120 h，大约在灌水 60 h 后微润管出流稳定，并测定其土壤 0~80 cm 土层平均含水率分别为田间持水量的 65%、71%和 77%)，开启阀门继续微润灌。每个小区的灌水量根据微润管条数、长度和实际灌水时间计算。

由于试验小区比较集中，各处理的降水量认为完全一致，采用距试验地约 300 m 的国家气象站数据获

得农田降水量。播种前对夏玉米、冬小麦种子进行筛选并灌水至田间持水率的 80%，以保证出苗纯度。

表1　试验方案及各处理灌溉定额

Table 1　Test plan and scale irrigation of every treatment

处理 Treatment	灌水方式(灌水器间距) Irrigation method (irrigation lateral spacing)	灌溉定额 Scale irrigation (mm)	
		夏玉米 Summer corn	冬小麦 Winter wheat
I_1	微润灌 Moistube-irrigation (60 cm)	58.13	75.61
I_2	微润灌 Moistube-irrigation (40 cm)	87.20	113.42
I_3	微润灌 Moistube-i rrigation (20 cm)	116.27	151.22
CK_1	地下滴灌 Subsurface drip irrigation (60 cm)	225.00	180.50
CK_2	无灌溉 No irrigation	0.00	0.00

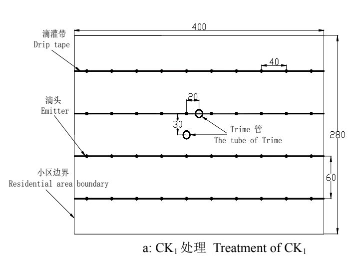
1.3　测定指标及方法

1.3.1　产量及水分利用效率

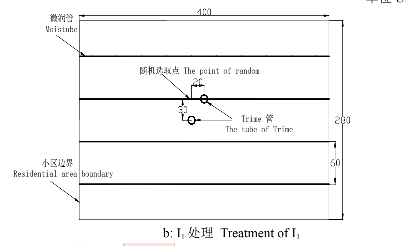
在夏玉米、冬小麦收获期各小区夏玉米、冬小麦进行脱粒获得所有籽粒，待风干后测其产量[20]，单位换算为 $kg\cdot hm^{-2}$。

采用 TRIME-PICO(德国)测定全生育期土壤体积含水率，每隔 3 d 测量 1 次，若遇降雨或灌溉，则在降雨或灌溉 24 h 后加测 1 次。每个小区选取两个监测点，滴灌处理(CK_1)：一根 TRIME 管埋设在距滴灌带 30 cm 处(两滴灌带之间)两个滴头中间，另一根埋设在滴灌带方向距滴头 20 cm 处，见图 2a；微润灌 I_1、I_2 与 I_3 处理：微润管方向随机选取一点，一根 TRIME 管埋设在该点的两条微润管之间，分别为 30 cm、20 cm 与 10 cm，另一根在微润管方向距离该点 20 cm 处，以 I_1 处理小区为例，见图 2b；无灌溉处理(CK_2)：在小区内随机选取 30 cm×20 cm 矩形框，在其对角线布置两根 TRIME 管。分别测量 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、50~60 cm 和 70~80 cm 土层深度的土壤含水率。

单位 Unit: cm



a: CK_1 处理 Treatment of CK_1



b: I_1 处理 Treatment of I_1

图 2　CK_1 与 I_1 处理灌溉管及 Trime 管布置示意图

Fig. 2　Layout diagram of irrigation tube and Trime pipe with treatments of CK_1 and I_1

批注 [m1]: 该图为 CAD 图，可在 CAD 软件中进行编辑

耗水量[21]由农田水分平衡求得：

$$ET_a = P + I - \Delta W \quad (2)$$

式中：ET_a 为作物生育期耗水量，mm；P 为作物生育期降雨量，mm；I 为作物生育期灌溉定额，mm；ΔW 为作物收获与播种时的土壤储水变化量，mm。

作物水分利用效率[22]，指作物单位耗水量产出的籽粒产量，可用式(3)计算：

$$WUE = Y/ET_a \quad (3)$$

式中：WUE 为作物水分利用效率，$kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$；$Y$ 为作物籽粒产量，$kg\cdot hm^{-2}$。

灌溉水分利用效率[23]指单位灌溉水量消耗所获得的籽粒产量，可用式(4)计算：

$$iWUE = Y/I \quad (4)$$

式中：iWUE 为作物灌溉水分利用效率，$kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$；$Y$ 为作物籽粒产量，$kg\cdot hm^{-2}$；I 为作物生育期灌溉定额，mm。

1.3.2　土壤电导率

采用 TRIME-PICO(德国)进行监测，布设位置见图 2。夏玉米在播种后 18 d、44 d、66 d 和 92 d，冬小麦于播种后 29 d、72 d、131 d、165 d、186 d 和 224 d 分别测定土壤电导率(EC_i)，每次测量深度为 10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、50~60 cm 和 70~80 cm，计算 10~80 cm 土层土壤平均电导率($\overline{EC}$)，由于该仪器无法测量 0~10 cm 土层的土壤电导率，因此本文没有分析该层土壤电导率的变化。

$$\overline{EC}= \sum_{i=1}^{5} EC_i / i \quad (5)$$

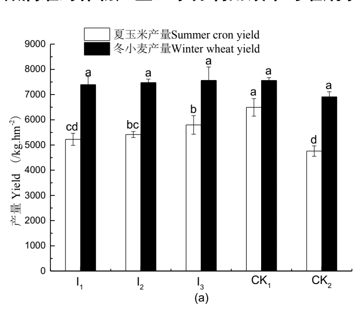
式中: $\overline{EC}$为土壤平均电导率, mS·cm^{-1}; EC_i为不同土层深度土壤电导率, mS·cm^{-1}; i 为土层数。

1.3.3　数据处理

利用SPSS 22.0软件进行均值误差分析, Origin Pro 9.0作图, 差异显著分析采用 F检验, 显著水平设置为P<0.05, 除特殊标注外, 图表中数据全部为3个重复的平均值。

2　结果与分析

2.1　微润灌对作物产量、水分利用效率与灌溉水分利用效率(iWUE)的影响



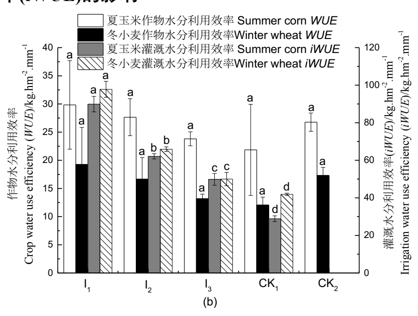


图 3　微润灌对作物产量(a)、作物水分利用效率(b)与灌水水分利用效率(b)的影响

Fig. 3　Effect of moistube-irrigation on crops yield (a), crop water use efficiency (b) and irrigation water use efficiency (b)

柱上不同小写字母表示同种作物相同指标不同处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters on the columns mean significant differences among different treatments for the same index and the same crop at 0.05 level.

批注 [m2]: 本论文图采用 origin 绘制，安装此软件，双击图可在该图中进行编辑。

由图 3 可知, 与地下滴灌(CK_1)对比, 夏玉米微润灌 I_1、I_2与 I_3分别比 CK_1的产量显著降低 19.52%、16.61%和 10.73%; 冬小麦 I_1、I_2与 CK_1相比产量有所降低, 但无显著性差异, I_3处理产量略高于 CK_1, 相差不大。与无灌溉(CK_2)处理对比, 微润灌 I_1、I_2与 I_3处理的夏玉米产量分别显著提高 9.81%、13.78%和 21.79%; 冬小麦产量也提高了 7.01%、8.19%和 9.42%, 但无显著性差异(P>0.05)。随微润管布置间距的减小, 夏玉米、冬小麦产量均呈增加趋势, 夏玉米与冬小麦 I_3比 I_1、I_2处理产量分别增加 10.91%、7.04%与 2.25%、1.13%, 夏玉米各处理间存在显著性差异, 而冬小麦各处理间无显著性差异。

冬小麦、夏玉米 I_1、I_2与 I_3处理的作物水分利用效率比 CK_1均有提高, 但无显著差异。I_1、I_2与 I_3处理夏玉米灌溉水分利用率分别比 CK_1处理显著提高 211.52%、115.18%与 72.74%; I_1、I_2与 I_3处理冬小麦灌溉水分利用率也分别比 CK_1的显著提高 133.51%、57.39%与 19.41%。随微润管布置间距的减小, 作物水分利用效率(WUE)与灌溉水分利用效率(iWUE)均呈减小趋势。夏玉米与冬小麦的 I_1比 I_2、I_3处理灌溉水分利用效率分别显著提高 43.47%、84.03%与 48.36%、95.62%。

2.2　微润灌对土壤电导率(EC)的影响

2.2.1　夏玉米、冬小麦生育期内 10~80 cm 土层土壤平均电导率($\overline{EC}$)变化情况

图 4 为不同处理下土壤平均电导率的变化过程。相同生育阶段, 微润灌、CK_1(地下滴灌)、CK_2(无灌溉)各处理间土壤平均电导率无显著性差异。不同作物类型, 全生育阶段土壤平均电导率呈不同变化趋势。从夏玉米苗期到灌浆成熟期, 各处理土壤平均电导率呈先增加后减小趋势, 在拔节期土壤平均电导率达到峰值; 从冬小麦苗期到灌浆成熟期, 各处理土壤平均电导率呈先减小后增加再减小趋势, 在苗期土壤平均电导率达到峰值。不同作物类型, 土壤平均电导率差异较大, 夏玉米土壤平均电导率(3.90~4.90 mS·cm^{-1})≥冬小麦土壤平均电导率(3.20~3.80 mS·cm^{-1})。

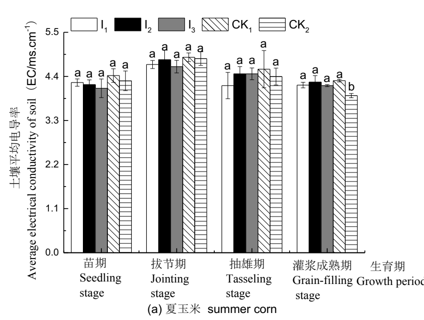
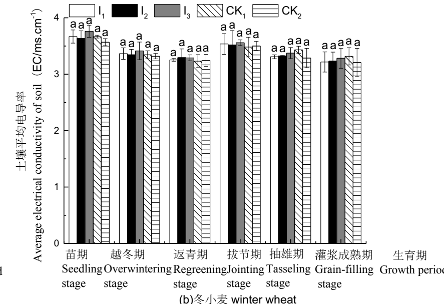



图 4　微润灌对夏玉米(a)和冬小麦(b)不同生育期土壤平均电导率的影响

Fig. 4　Effect of moistube-irrigation on average electrical conductivity of soil at different growth stages

柱上不同小写字母表示同种作物相同指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters on the columns mean significant differences among different treatments for the same index and the same crop at 0.05 level.

2.2.2　不同深度土壤电导率(EC)的变化情况

2.2.2.1　全生育期平均土壤电导率 EC 随土层深度的变化趋势

通过单因素方差分析发现, 在相同生育期, 随土层深度的增加, 各处理间土壤电导率无显著性差异($P>0.5$), 均呈相同变化趋势, 说明微润灌与地下滴灌、无灌溉对土壤电导率的影响类似。不同作物在全生育阶段, 土壤电导率随土层深度的变化趋势见图 5, 图中 15 cm、25 cm、35 cm、55 cm 与 75 cm 处电导率代表 10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、50~60 cm 和 70~80 cm 土层深度的土壤电导率。

由图 5 知, 夏玉米全生育期平均土壤电导率随土层深度的增加呈先增加后减小趋势, 50~60 cm 土层达峰值, 地下滴灌的夏玉米全生育期平均土壤电导率较大。随土层深度的增加, 冬小麦全生育期平均土壤电导率呈增加趋势。

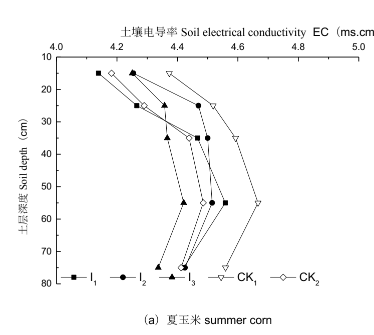
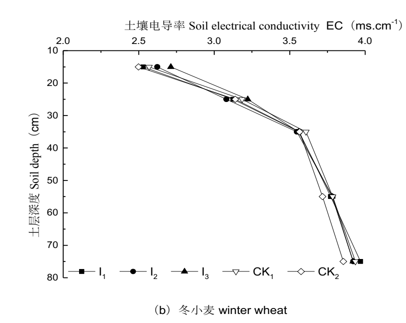



图 5　不同处理对夏玉米(a)、冬小麦(b)全生育期平均土壤电导率的影响

Fig. 5　Effect of moistube-irrigation on average electrical conductivity in different soil depths during summer corn (a) and winter wheat (b) growing seasons

2.2.2.2　不同生育阶段平均土壤电导率 EC 随土层深度的变化趋势

图 6 为不同生育阶段, 夏玉米土壤电导率 EC 随土层深度的变化。由图 6 可知, 不同夏玉米生育时期, 土壤电导率随土层深度变化的趋势不同。苗期土壤电导率基本随着土层深度的增加而减小, 拔节期土壤电导率呈“*S*”形变化趋势, 但不同深度差异较小, 集中在 4.5~5.0 $mS\cdot cm^{-1}$。抽雄期与灌浆成熟期土壤电导率均随土层深度的增加呈增大趋势, 到生育期末土壤电导率随深度增加的趋势变快。夏玉米生育初期, 浅层土壤电导率明显大于深层。随夏玉米的生长, 浅层土壤电导率逐渐减小, 而深层土壤电导率逐渐增大。在生育期末, 深层土壤电导率显著大于浅层土壤电导率, 拔节期为转折点, 此时土壤平均电导率达到峰值。

不同灌溉处理的土壤电导率不同。全生育期对照 CK_1(地下滴灌)的土壤电导率均最大, 在苗期和拔节期 I_3 处理的土壤电导率最小, 抽雄期与灌浆成熟期 CK_2(无灌溉)的最小。不同处理之间土壤电导率存在一定的

差异。苗期和灌浆成熟期不同处理之间土壤电导率的平均差异较大，拔节期和抽雄期最小。不同处理土壤电导率差异最大出现在苗期 50~60 cm 土层，最大值为 CK_1 的 4.48 $ms·cm^{-1}$，最小值为 I_3 处理的 3.94 $ms·cm^{-1}$，相差 13.71%。

通过单因素方差分析发现，不同处理各土层之间土壤电导率存在不同差异性。夏玉米苗期，降雨少，土壤水分的增加由灌溉决定，随着土层深度的增加，I_2 不同深度土壤电导率变化差异性较小，表现为 10~60 cm 土层无显著性差异，仅 70~80 cm 与 10~60 cm 土层存在显著性差异；I_1 和 I_3 不同土层深度的土壤电导率差异性相同，表现为 10~40 cm 土层无显著性差异，50~60 cm、70~80 cm 与 10~40 cm 土层存在显著性差异。与地下滴灌(CK_1)对比，微润灌灌水量越大不同深度土层的土壤电导率差异性越大；与无灌溉(CK_2)对比，微润管布置间距越大(灌水量越小)不同深度的土壤电导率差异性越小。拔节期与抽雄期，降雨较多，各处理不同土层深度的土壤电导率无显著性差异。灌浆成熟期，I_2 处理不同土层土壤电导率变化差异性较小，I_1 和 I_3、地下滴灌与无灌溉处理土壤电导率差异性大，均表现为 70~80>50~60>30~40>20~30>10~20 cm 土层。

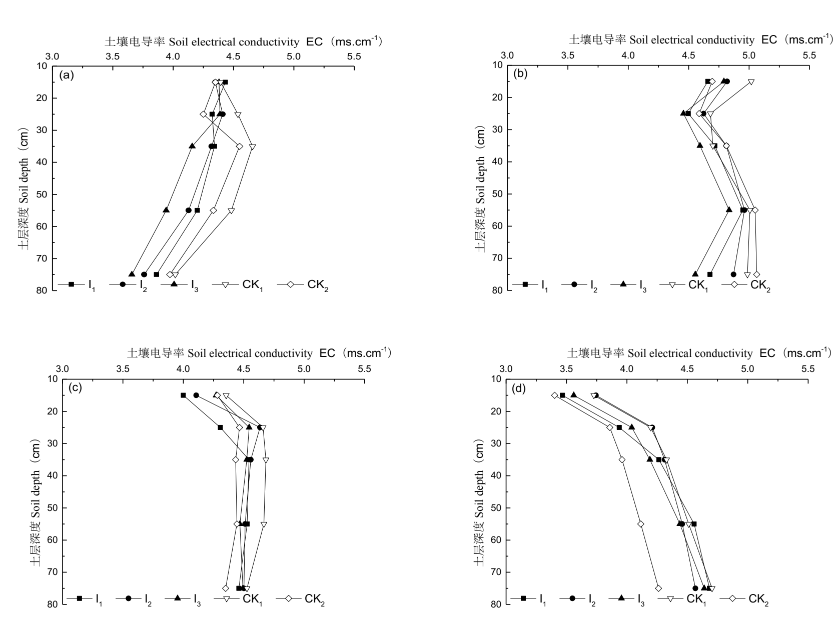


图 6　不同处理对夏玉米苗期(a)、拔节期(b)、抽雄期(c)和灌浆成熟期(d)土壤电导率的影响

Fig. 6　Effect of moistube-irrigation on electrical conductivity of soil at seedling (a), jointing (b), tasseling (c) and grain-filling (d) stages of summer corn

图 7 为不同生育阶段，冬小麦土壤电导率 EC 随土层深度的变化趋势。由图 7 可知，不同冬小麦生育阶段，土壤电导率随土层深度变化的趋势基本类似，均随土层深度的增加呈增加趋势，表现为 70~80 cm>50~60 cm>30~40 cm>20~30 cm>10~20 cm 土层。随冬小麦的生长，浅层土壤电导率基本呈减小趋势，深层土壤电导率基本趋于稳定不变。在苗期各土层土壤电导率均大于其他生育期相同土层。各生育阶段 40~80 cm 土层土壤电导率显著大于 10~40 cm 土层土壤电导率，全生育期不同土层苗期 80 cm 土层土壤电导率最大。不同处理土壤电导率差异较小，均无显著性差异。

通过单因素方差分析发现，在冬小麦各生育阶段，不同处理下各土层之间土壤电导率存在显著差异性。均表现为 50~60、70~80 cm 土层土壤电导率显著较高，10~20 cm 最小。I_2 处理土壤电导率变化差异性较小，对照组与 I_3 类似。

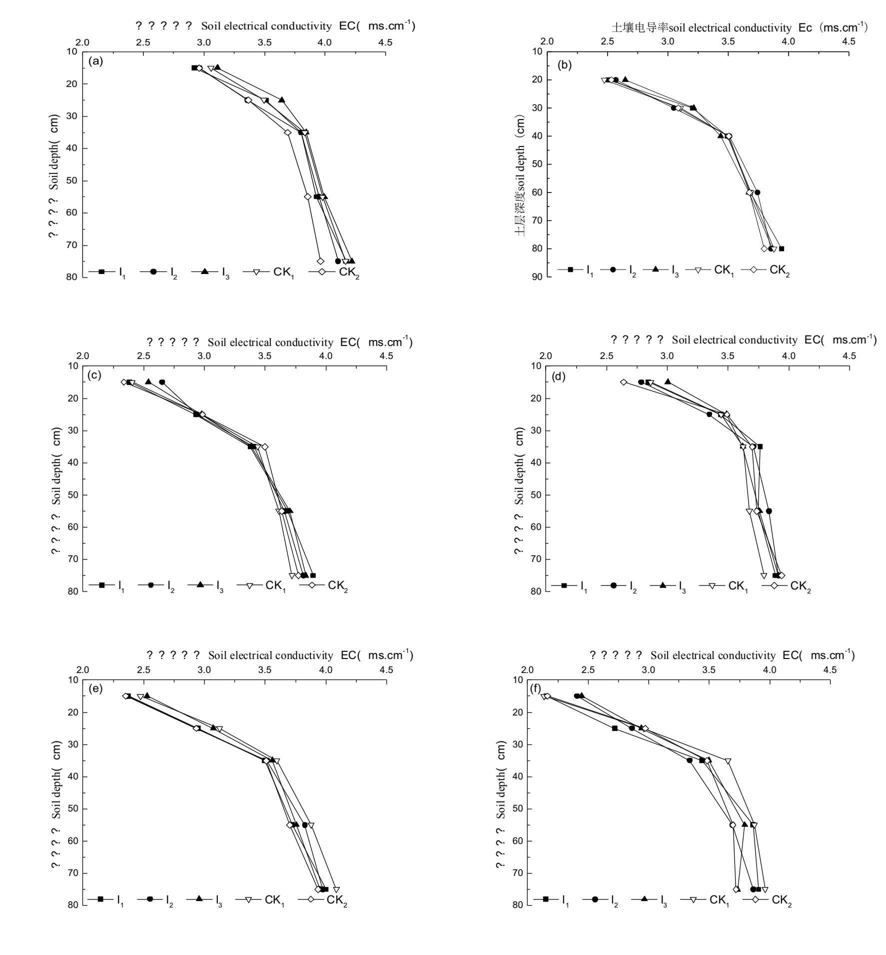


图 7 不同处理对冬小麦苗期(a)、越冬期(b)、返青期(c)、拔节期(d)、抽穗期(e)与灌浆成熟期(f)土壤电导率的影响

Fig. 7 Effect of moistube-irrigation on electrical conductivity of soil at seedling (a), overwintering (b), regreening (c), jointing (d), heading (e) and grain-filling (f) stage of winter wheat

2.3 微润灌土壤电导率与产量的相关关系

采用 Pearson 相关系数对不同生育时期不同深度土壤电导率与夏玉米、冬小麦产量进行双尾显著性检验，分析结果如表 2。

根据相关性分析，认为夏玉米、冬小麦产量与灌浆成熟期10~80 cm土层土壤平均电导率、10~20 cm土层土壤电导率相关性显著($P<0.05$)。因此，以线性回归方法建立灌浆成熟期10~80 cm土层土壤电导率与产量之间关系，如图8。

表2 不同生育期土壤电导率与产量相关关系

Table 2 Relationship between soil electrical conductivity and yields at different growth stages

作物 Crop	土层深度 Depth of soil (cm)	生育期 Growth stage					
		苗期 Seedling stage	越冬期 Overwintering stage	返青期 Regreening stage	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆成熟期 Grain-filling stage
夏玉米 Summer corn	20	0.127	—	—	0.401	0.307	0.724**
	30	0.417	—	—	0.055	0.325	0.388

	40	0.191	—	—	−0.111	0.459	0.302
	60	0.128	—	—	−0.240	0.149	0.465
	80	0.020	—	—	−0.159	0.312	0.531*
	平均 Average	0.260	—	—	−0.032	0.474	0.721**
冬小麦 Winter wheat	20	0.103	0.443	0.351	0.359	0.393	0.713*
	30	0.315	0.404	−0.045	−0.160	0.427	0.457
	40	0.354	−0.146	−0.480	−0.173	0.045	0.376
	60	0.530*	0.084	0.055	0.059	0.289	0.634*
	80	0.670*	0.433	0.108	0.157	0.496	0.440
	平均 Average	0.511*	0.549*	0.015	0.098	0.495	0.879**

*和**分别表示在5%和1%水平上显著相关。* and ** mean significant correlations at 0.05 and 0.10 levels, respectively (2-tailed).

由表2可知，夏玉米、冬小麦产量与土壤电导率均呈正相关性；与灌浆期10~20 cm土层土壤电导率相关性显著，与该生育阶段10~80 cm土层土壤平均电导率相关性也显著。

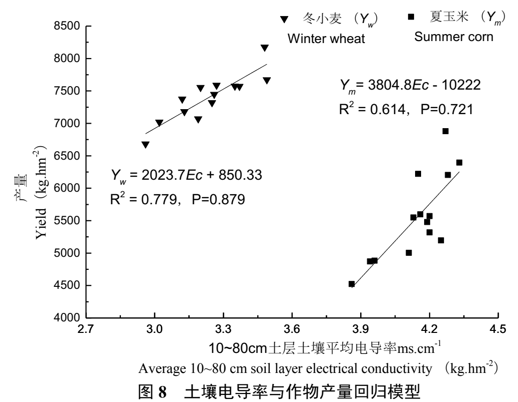


图 8　土壤电导率与作物产量回归模型

Fig. 8　Regression models of soil electrical conductivity and crop yields

由图8可知，夏玉米、冬小麦产量与灌浆成熟期10~80 cm土层土壤平均电导率在3.86~4.44 $mS\cdot cm^{-1}$、2.96~3.48 $mS\cdot cm^{-1}$范围内呈线性增加趋势，其中模型决定系数R^2与Pearson相关系数均较高，因此，采用该生育阶段10~20 cm土层土壤电导率或者10~80 cm土层土壤平均电导率预估夏玉米、冬小麦产量具有可行性。

3　讨论

微润灌影响土壤水、热、气、肥，从而对作物生长及产量产生不同程度的影响。土壤电导率在不同程度上反映土壤中盐、水、有机物、无机物、土壤结构等，它作为一种复杂的土壤理化参数，可用于土壤生产潜力的评估[24]。

3.1　微润灌对产量、作物水分利用效率及灌溉水分利用效率的影响

微润管出流小，灌水时间长，属于线源灌溉，滴灌带出流大，灌水时间短，属于点源灌溉，两种灌溉方式土壤水分时空分布不同，导致作物根系吸水量不同，进而对作物产量、水分利用效率产生影响。前人研究认为，微润灌温室黄瓜的水分利用效率高于滴灌[5]，膜下滴灌玉米产量高于微润灌，水分利用效率显著低于微润灌，微润管间距60 cm土壤水分利用效率高[25]。本试验发现夏玉米产量显著低于地下滴灌，可能由于夏玉米全生育期温度高，蒸发量大，对灌溉水量比较敏感，微润灌供水量约为地下滴灌的1/2[26]，微润灌在夏玉米全生育期供水持续稳定，然夏玉米关键需水期需水量远大于微润灌供水，使其生长受限制，进而影响产量的增加。在大田夏玉米、冬小麦轮作试验中微润灌(毛管间距20 cm)夏玉米灌水量为地下滴灌灌水量1/2，冬小麦灌水量为地下滴灌灌水量4/5，以此类推发现随微润灌灌水量的增加，微润灌作物产量与地下

滴灌产量差距逐渐减小且灌水量为地下滴灌的4/5时逐渐高于地下滴灌，同时为提高作物水分利用效率，建议实践应用中，在作物关键需水期(夏玉米抽雄及灌浆成熟期、冬小麦抽穗及灌浆成熟期)可适当增大微润灌工作压力，增加灌溉水量，从而改变与地下滴灌产量的差异性，提高微润灌大田适用性。本研究还发现随微润管布置间距的减小，作物产量呈增加趋势，灌溉水分利用效率呈显著减小趋势(P<0.05)，微润管布置间距的减小，可增加小区灌水量，通过对全生育期10~80 cm土壤平均体积含水率分析发现，土壤含水率分别为25.58%、26.19%与27.93%，土壤含水率与产量呈正相关关系(灌水下限40%~75%田间持水率)[27]，导致作物产量呈增加趋势，分析发现微润灌夏玉米、冬小麦产量在微润管布置60 cm、40 cm与20 cm处理间不存在显著性差异，但灌溉定额之间存在显著性差异，因此，灌溉水分利用效率呈显著减小趋势。综合考虑分析，在不显著降低产量的同时可提高水分利用效率的最佳微润管布置间距为60 cm。

3.2 微润灌对土壤电导率的影响

土壤电导率影响因素有土壤全氮含量、K^+、NO_3^-、pH、土壤体积含水率、土壤干重以及有机质等，土壤养分离子及有机质含量的增加，土壤阳离子越多，土壤胶体吸附的负离子就越多，土壤电导率也就越大[28]。在一定范围内作物产量随土壤电导率的提高而增加[14]，若Na^+、Mg^{2+}等离子含量过高引起土壤电导率升高时，土壤出现盐碱化，则影响作物生长及产量。本试验土壤为非盐碱化土壤，灌溉水为自来水，Na^+、Mg^{2+}等盐化离子含量低，土壤电导率变化主要反映土壤养分离子含量的变化[29-30]。本研究通过对不同深度各处理间的土壤电导率进行单因素方差分析发现，各处理之间无显著性差异(P>0.05)。表明微润灌与地下滴灌、无灌溉对土壤电导率(养分离子含量)的影响基本一致，该新型灌水技术适用于大田夏玉米、冬小麦灌溉，同时微润灌为小流量连续灌溉，出流量与作物生长需水量处在动态平衡中，土壤养分向下运移很慢，几乎保持在作物根系生长层，土壤有效养分供给稳定，从而进一步提高微润灌大田适用性。

土壤可溶性离子组成、含量及其比例关系是土壤电导率的重要影响因素[14]。研究认为土壤体积含水率在 15%~30%时，水分是影响土壤电导率的主要因素，体积含水率在 30%以上时，影响土壤电导率的主要因素是土壤养分离子[9]。本研究发现夏玉米土壤电导率显著大于冬小麦，通过对 10~80 cm 土层土壤含水率分析发现，夏玉米全生育期土壤平均体积含水率比冬小麦高 4%左右，同时，夏玉米拔节期(8 月 6 日)追施加尿素，可显著提高 NH_4^+、NO_3^-离子含量，由于尿素分解的 NH_4^+对吸附态盐基离子的交换作用增加水溶性 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等离子含量[31-32]，导致本次试验夏玉米土壤含水率与离子浓度均大于冬小麦。本研究还发现全生育期土壤电导率随土层深度的增加，夏玉米呈先增加后减小趋势、冬小麦呈增加趋势，出现上述结果的原因夏玉米可能是由于生育期温度高，土壤浅层水分蒸发量大，本试验测定 10~20 cm 土层土壤体积含水率比 50~60 cm 土层体积含水率小 6%左右，同时，夏玉米主根系集中在 10~20 cm 土层，随土层深度的增加，夏玉米根系呈减小趋势，作物生长吸收土壤养分，导致离子含量减小，且土壤电导率与离子含量呈正相关关系[33-35]。综上，由于土壤水分与作物根系吸收离子双重作用导致 10~20 cm 土层土壤电导率小于 50~60 土层，然而 70~80 cm 土层土壤电导率又小于 50~60 cm 土层，可能是由于土壤含水率的差异引起的，微润灌出流小，该流量除被作物吸收外，剩余水分保持在微润管附近，难补充深层土壤水分，且距离微润管距离越远土壤含水量相对较小，分析发现 0~80 cm 土层土壤含水率低于 50~60 cm 土层体积含水率约 2%左右。冬小麦可能是由于生育期温度低，蒸发小，土壤养分离子随水分向上运移较小，作物种植密度较大，且根系主要集中在表层，随土层深度的增加土壤根系体积逐渐减小，导致养分离子吸收较少，同时分析发现随着土层深度的增加土壤体积含水率呈增加趋势，由于蒸发与作物吸收双重作用使土壤电导率呈增加趋势。

3.3 微润灌下土壤电导率与作物产量的相关关系

土壤电导率与不同作物产量之间可能存在不同的相关性，土壤电导率与玉米产量存在相关关系且具有有较高的灰色关联度，土壤电导率可以用来评估作物产量[28,36-38]，不同深度土层电导率与作物产量的相关性也不同[39]，不同作物品种土壤电导率与其产量存在不同程度上的相关性，例如番茄的产量与土壤电导率呈反函数关系[40]，棉花、玉米的产量在一定范围内随土壤电导率的增加呈增加趋势[36,41-42]。也有学者认为产量与土壤电导率没有明显的一致性关系，如Corwin等[24]。本研究发现微润灌下大田夏玉米、冬小麦灌浆成熟期10~20 cm土层土壤电导率、10~80 cm土层土壤平均电导率与产量存在显著正相关关系，主要是由于灌浆成熟期是干物质积累与转移[43]，在该时段作物的根系生长环境直接决定了作物产量的高低，微润管出流小，供水持续，在施肥等管理措施相同情况下，夏玉米、冬小麦根区土壤的水肥环境比较稳定，同时微润管埋深20 cm土层，该土层为夏玉米根系集中区，前人研究发现根系生长与产量存在显著性关系[44-45]。因此，采用灌浆成熟期10~20 cm土层土壤电导率和10~80 cm土层土壤平均电导率预估夏玉米、冬小麦产量具有可行性。然本试验发现冬小麦灌浆成熟期土壤电导率与产量呈显著正相关关系，与赵勇等[12]研究表明在灌浆

成熟期土壤电导率与产量之间呈负相关关系相反，可能因为灌水方式的差异，还可能是由于测量土壤电导率的方法与仪器的区别，赵勇测定土壤电导率采用电导仪DDB-307，水：土=5：1，土样经扰动处理，主要测定土壤离子含量，很难反映原状土壤真实性。本试验采用TDR测定，土样为土壤原状土，能够反映土壤中盐、水、有机物、无机物、土壤结构等综合性土壤因素。

4 结论

1)微润灌与地下滴灌相比，节水效果显著，作物产量有所降低，但不同作物产量降低情况不同。微润灌夏玉米灌水利用效率提高了211.52%~72.74%($P<0.05$)，冬小麦为133.51%~19.41%($P<0.05$)。随微润灌灌水量的增加，微润灌与地下滴灌相比二者作物产量差异逐渐减小，当灌水量达到一定程度则高于地下滴灌。微润灌作为大田作物适宜的灌水技术之一，为了提高大田适用性，建议实践中，应在作物需水关键期(抽雄及灌浆成熟期)适当增大微润灌工作压力，增加灌水量，保证作物高产。

2)随微润管布置间距的减小，夏玉米、冬小麦产量均呈增加趋势，水分利用效率与灌溉水分利用效率均呈减小趋势。综合考虑分析，在较为缺水的塿土地区，微润管布置间距60 cm可不显著降低作物产量的同时提高水分利用效率。

3)微润管布置间距对土壤电导率影响较小，微润灌与地下滴灌、无灌溉处理的土壤电导率随土层深度增加，各生育期土壤电导率变化趋势基本一致且各处理间无显著性差异($P>0.05$)，表明微润灌与地下滴灌对土壤的影响基本一致，同样适用于大田夏玉米、冬小麦灌溉。

4)微润灌夏玉米、冬小麦产量与灌浆成熟期 10~20 cm 土层土壤电导率和 10~80 cm 土层土壤平均电导率之间相关性显著，可采用灌浆成熟期 10~20 cm 土层土壤电导率或者 10~80 cm 土层土壤平均电导率预估微润灌作物产量。

参考文献 References

[1] 牛文全，张明智，许健，等. 微润管出流特性和流量预报方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 217–224
Niu W Q, Zhang M Z, Xu J, et al. Prediction methods and characteristics of flow for moistube[J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(6): 217–224
[2] 薛万来，牛文全，张子卓，等. 微润灌溉对日光温室番茄生长及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究，2013，31(6): 61–66
Xue W L, Niu W Q, Zhang Z Z, et al. Effects of the tomato growth and water use efficiency in sunlight greenhouse by moistube-irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 61–66
[3] 张珂萌，牛文全，薛万来，等. 间歇和连续灌溉土壤水分运动的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 11–16
Zhang K M, Niu W Q, Xue W L, et al. Simulation of soil water movement under intermittent and continuous irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3): 11–16
[4] 陈建，陆鹏飞，杜红磊. 微润灌技术在荒山绿化工程中应用的经济分析[J]. 价值工程, 2014, (31): 100–101
Chen J, Lu P F, Du H L. Economic analysis of application of micro irrigation in greening of barren hills[J]. Value Engineering, 2014, (31): 100–101
[5] 于秀琴，窦超银，于景春. 温室微润灌溉对黄瓜生长和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(7): 159–163
Yu X Q, Dou C Y, Yu J C. The effect of self-suction micro-irrigation on growth and yield of *Cucumis statirus* L. in greenhouse[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(7): 159–163
[6] 汤英，杜历，杨维仁，等. 果树微润灌溉条件下土壤水分变化特征试验研究[J]. 节水灌溉, 2014, (4): 27–30
Tang Y, Du L, Yang W R, et al. Experimental study on soil moisture change characteristics under fruit trees moistube-irrigation condition[J]. Water Saving Irrigation, 2014, (4): 27–30
[7] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 39–41
Sun Y R. Experimental survey for the effects of soil water content and soil salinity on soil electrical conductivity[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 39–41
[8] 汪懋华. "精细农业"发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1–8
Wang M H. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 1–8
[9] 李民赞，王琦，汪懋华. 一种土壤电导率实时分析仪的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 51–55
Li M Z, Wang Q, Wang M H. Testing and modeling of soil EC sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 51–55
[10] 刘广明，杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(S1): 85–87
Liu G M, Yang J S. Study on the correlation of soil salt content with electric conductivity and soil water content[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(S1): 85–87
[11] 刘广明，杨劲松，姚荣江. 影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 247–252
Liu G M, Yang J S, Yao R J. Chemical factors to electrical conductivity of soil extract and their intensity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(2): 247–252
[12] 赵勇，李民赞，张俊宁. 冬小麦土壤电导率与其产量的相关性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(S2): 34–37

Zhao Y, Li M Z, Zhang J N. Correlation between soil electrical conductivity and winter wheat yield[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(S2): 34–37
[13] Stadler A, Rudolph S, Kupisch M, et al. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 64: 8–20
[14] 袁大刚, 张甘霖. 不同土地利用条件下的城市土壤电导率垂直分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 171–176
Yuan D G, Zhang G L. Vertical distribution characterization of electrical conductivity of urban soil under different land use type[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 171–176
[15] Valdés R, Ochoa J, Franco J A, et al. Saline irrigation scheduling for potted geranium based on soil electrical conductivity and moisture sensors[J]. Agricultural Water Management, 2015, 149: 123–130
[16] McBride R A, Gordon A M, Shrive S C. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(1): 290–293
[17] 余坤, 冯浩, 王增丽, 等. 氨化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 165–173
Yu K, Feng H, Wang Z L, et al. Ammoniated straw improving soil structure and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 165–173
[18] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 299
Wang Z N. Irrigation and Drainage Engineering[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 299
[19] 周新国, 韩会玲, 李彩霞, 等. 拔节期淹水玉米的生理性状和产量形成[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 119–125
Zhou X G, Han H L, Li C X, et al. Physiological characters and yield formation of corn (*Zea mays* L.) under waterlogging stress in jointing stage[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9): 119–125
[20] 袁宇霞, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥灌水下限和施肥量对温室番茄生长、产量和生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 76–83
Yuan Y X, Zhang F C, Zhang Y, et al. Effects of irrigation threshold and fertilization on growth, yield and physiological properties of fertigated tomato in greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 76–83
[21] 张雷, 牛芬菊, 李小燕, 等. 旱地全膜双垄沟播秋覆膜对玉米产量和水分利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 142–145
Zhang L, Niu F J, Li X Y, et al. Effects of planting in furrow and whole plastic-film mulching on double ridges in autumn on yield index of corn production and water use efficiency in dry lands[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(22): 142–145
[22] 李荣, 王敏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 106–113
Li R, Wang M, Jia Z K, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei highland[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 106–113
[23] 段爱旺. 水分利用效率的内涵及使用中需要注意的问题[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(1): 8–11
Duan A W. Connotation of water use efficiency and its application in water-saving practice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(1): 8–11
[24] Corwin D L, Lesch S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1/3): 11–43
[25] 何玉琴, 成自勇, 张芮, 等. 不同微润灌溉处理对玉米生长和产量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(4): 566–569
He Y Q, Cheng Z Y, Zhang R, et al. Effects of different ways of micro-moist irrigation on growth and yield of maize[J]. Journal of South China Agricultural University, 2012, 33(4): 566–569
[26] 刘恩民, 张代桥, 刘万章, 等. 鲁西北平原农田耗水规律与测定方法比较[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 190–196
Liu E M, Zhang D Q, Liu W Z, et al. Water consumption of the crops in the northwestern Shandong plain and comparisons of lysimeter and eddy covariance technique[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 190–196
[27] 王建东, 龚时宏, 许迪, 等. 灌水模式对冬小麦根系空间分布及多年产量的影响[J]. 水利学报, 2011, 42(10): 1239–1246
Wang J D, Gong S H, Xu D, et al. Effects of irrigation models on the space distribution of root system and yield of winter wheat[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(10): 1239–1246
[28] 杨玮, 孙红, 郑立华, 等. 基于土壤参数的冬小麦产量预测模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 118–123
Yang W, Sun H, Zheng L H, et al. Prediction model of winter wheat yield based on soil parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 118–123
[29] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 等. 西安市郊区日光温室大棚番茄施肥现状及土壤养分累积特性[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 287–290
Zhou J B, Zhai B N, Chen Z J, et al. Fertilizers application and nutrient accumulations in tomato-grown soils under greenhouse condition in the suburban of Xian City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(2): 287–290
[30] 许逸林, 朱雯, 戚嘉敏, 等. 油茶林地土壤电导率与其养分含量的相关性[J]. 经济林研究, 2016, 34(3): 126–129
Xu Y L, Zhu W, Qi J M, et al. Relationship between relative electric conductivity and its nutrient contents in soils at camellia oleifera forests[J]. Nonwood Forest Research, 2016, 34(3): 126–129
[31] 夏立忠, 李忠佩, 杨林章. 大棚栽培番茄不同施肥条件下土壤养分和盐分组成与含量的变化[J]. 土壤, 2005, 37(6): 620–625
Xia L Z, Li Z P, Yang L Z. Changes in composition and content of nutrients and water soluble salts in soil under plastic greenhouse tomato cultivation in relation to fertilization[J]. Soils, 2005, 37(6): 620–625
[32] 刘媛媛, 李廷轩, 余海英, 等. 有机肥与尿素配施对设施土壤盐分含量与组成变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 292–298
Liu Y Y, Li T X, Yu H Y, et al. Effect of interaction between manure and inorganic fertilizers on salt content and ion composition in greenhouse soil[J]. Journal of Agro-environment Science, 2009, 28(2): 292–298

[33] 葛菁萍，霍云鹏，蔡柏岩. 大棚土壤剖面$EC_{25℃}$值变化研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(2): 80–81
Ge J P, Huo Y P, Cai B Y. Studies on EC variation in soil profile in plastic quonset[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(2): 80–81
[34] 李廷轩，张锡洲，王昌全，等. 保护地土壤次生盐渍化的研究进展[J]. 西南农业学报, 2001, 14(S1): 103–107
Li T X, Zhang X Z, Wang C Q, et al. Progress in the study on soil salinization of protected farmland[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2001, 14(S1): 103–107
[35] 王维真，小林哲夫. 利用TDR对土壤含水量及土壤溶液电导率的同步连续测量[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 488–493
Wang W Z, Kobayashi T. Continuous measurement of soil water content and soil solution electrical conductivity by using TDR[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 488–493
[36] Guo W X, Maas S J, Bronson K F. Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and Landsat imagery[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(6): 678–692
[37] Kitchen N R, Sudduth K A, Drummond S T. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils[J]. Journal of Production Agriculture, 1999, 12(4): 607–617
[38] Sun Y, Druecker H, Hartung E, et al. Map-based investigation of soil physical conditions and crop yield using diverse sensor techniques[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(2): 149–158
[39] Sun Y R, Cheng Q, Lin J H, et al. Investigating soil physical properties and yield response in a grassland field using a dual-sensor penetrometer and EM38[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176(2): 209–216
[40] Magán J J, Gallardo M, Thompson R B, et al. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(9): 1041–1055
[41] 张建兵，杨劲松，姚荣江，等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. 农业工程学报，2013, 29(15): 116–125
Zhang J B, Yang J S, Yao R J, et al. Dynamics of soil water, salt and crop growth under farmyard manure and mulching in coastal tidal flat soil of northern Jiangsu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 116–125
[42] 冯棣，张俊鹏，孙池涛，等. 咸水灌溉棉田保证棉花优质高产的土壤盐度指标控制[J]. 农业工程学报，2014，30(24): 87–94
Feng D, Zhang J P, Sun C T, et al. Index controlling soil salinity for cotton field with salt irrigation subject to high quality and yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 87–94
[43] 党红凯，李伟，曹彩云，等. 乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质转运的影响[J]. 农业机械学报，2014，45(5): 131–138
Dang H K, Li W, Cao C Y, et al. Effects of late milk irrigation on water use efficiency and dry matter distribution of maize[J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(5): 131–138
[44] 周昌明，李援农，银敏华，等. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报，2015，31(7): 109–117
Zhou C M, Li Y N, Yin M H, et al. Ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridges for rain harvesting improving root growth and yield of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 109–117
[45] 魏镇华，陈庚，徐淑君，等. 交替控水条件下微润灌溉对番茄耗水和产量的影响[J]. 灌溉排水学报，2014，33(4/5): 139–143
Wei Z H, Chen G, Xu S J, et al. Responses of tomato water consumption and yield to moistube irrigation under controlled alternate partial root-zone irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(4/5): 139–143